基于多模式逆向水质模型的程海水位调控--水质响应 预测研究

邹锐^{1,4},董云仙²,颜小品³,赵磊²,贺彬²,刘永^{3*}

Tetra Technologies Incorporated Company 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. 中国昆明高原湖泊国际研究中心,昆明 650034; 3. 北京大学环境科学与工程学院,水沙科学教育部重点实验室,北京 100871; 4. 昆明诚锐环保科技有限公司,昆明 650224)

摘要: 以云南省程海为例,基于 CE-QUAL-W2 计算平台开发了水动力-水质模型.由于程海现有的数据不足以支撑开发可靠的 流域水文与污染物负荷模型,为弥补由此引起的水质模型边界条件缺失的限制,本研究提出了基于逆向模拟与遗传算法的多 模式负荷-参数识别方法来实现对水质模型的校正和鲁棒校验.应用校验后的模型对程海不同水位调控情景的水质响应进行 鲁棒预测分析,为决策者提供了基于不确定性的量化水质响应,从而有助于制定可靠的管理策略.研究结果表明,程海水位调 控对 TN、TP 及 COD 等水质指标的改善作用非常有限.

关键词:水质水动力模型;逆向模拟;遗传算法;多模式参数识别;鲁棒预测 中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)11-3193-07

Multiple Pattern Inverse Water Quality Modeling Approach for Predicting the Water Quality Consequence of Lake Chenghai Water Elevation Control

ZOU Rui^{1 A}, DONG Yun-xian², YAN Xiao-pin³, ZHAO Lei², HE Bin², LIU Yong³

(1. Tetra Technologies Incorporated Company 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. Kunming International Center for Pleantu Lakes, Kunming 650034, China; 3. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Kunming Challenger Technology, Ltd., Kunming 650224, China)

Abstract: A water quality model was developed through incorporating the water surface elevation and water quality data of Lake Chenghai into the CE-QUAL-W2 computational platform. The model integrates the water surface elevation and water quality into a holistic dynamic system based on the data of Lake Chenghai , and was calibrated against observed data using a multiple pattern inverse water quality modeling technology , which was driven by a robust genetic algorithm (GA). After the model was calibrated , it was used to produce robust predictions of the lake water quality in response to various water elevation controlled scenarios. The model established a basis for quantifying the water quality responses under uncertainty , and is valuable for supporting effective and reliable management decision making. The results of this research suggest that various water elevation control scenarios only result in insignificant water quality improvement in terms of TN , TP , and COD concentrations , therefore , it does not recommend to consider water elevation control to be the major water quality management option for Lake Chenghai.

Key words: hydrodynamic and water quality model; inverse modeling; genetic algorithms (GA); multiple pattern parameter identification; robust prediction

水位及水量变动是影响湖泊水质与水生态系统 长期变化的重要因素;湖泊的水位调控不仅可调节 水体中营养物质的浓度,同时还可以进而影响浮游 植物生产力和空间分布的差异;因此,研究湖泊水位 变动的水质与水生态响应,对于湖泊水质改善与生 态恢复具有重要价值.已有研究分析了湖泊水位变 动的响应,但在定量的模拟研究方面相对缺乏^[1-5]. 由于湖泊水位变化与水质、水生态间的关系较为复 杂,且难以用单纯的数学统计方法获得,因此基于机 制数学表达的水质模型被认为是解析真实系统中水 位调控对水质影响的可靠方法^[6-7].参数识别对水 质模型的精确性和稳定性十分重要; 传统上,水质模型的参数识别是通过试错法进行校正实现的,但是 该方法存在主观性,且不能充分处理参数模式不确 定性的问题^[8].为弥补传统方法的缺陷,同时也为 了解决在某些情况下水质模型参数估值时数据不足 的缺陷,基于反演模型方法(或逆向模型方法)的系

收稿日期:2010-12-15;修订日期:2011-04-19

基金项目:云南省科技厅社会事业发展专项(2009CA002);国家水体 污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-001)

作者简介:邹锐(1968~),男,博士,研究员,主要研究方向为水环境 模型, E-mail: rz5q@ yahoo.com

^{*} 通讯联系人 , E-mail: yongliu@ pku. edu. cn

统性参数识别方法在近年来逐步成为研究的热点^[9-11],但求解这类多模式逆向模型问题常常存在解不唯一的问题;克服这个困难的一个可行方法是使用非单值解来表征水质模型参数模式的不确定性^[8,12,13].程海为云南省九大高原湖泊之一,在其水质恢复与富营养化控制中,有关管理机构提出了实施外流域调水工程、调控程海水位以改善水质状况的建议;但由于缺乏系统深入的研究,目前对外流域调水的水质影响尚不可知.为此,本研究主要目标是构建基于 CE-QUAL-W2 的水动力-水质模型,采用逆向模型技术和遗传算法(GA)构建多模式逆向参数估值技术来识别模型参数;并应用此模型对拟实施的程海水位调控的水质响应进行预测分析.

1 模型框架

1.1 程海流域

程海是云贵高原较为独特的湖泊,地处青藏高 原与云贵高原的衔接部位,东经100°33′~100°45′、 北纬26°25′~24°40′;湖面面积 74.6 km²、平均水深 26.5 m 流域面积 318.3 km². 程海多年平均入湖水 量 1.67 亿 m³, 蓄水量 19.2 亿 m³.由于程海特殊的 封闭型特征、无水体交换,造成营养物质的长期积 累;尤其是1980年代后,湖周农业生产方式转变和 湖滨区螺旋藻养殖业快速发展,程海富营养化发展 加速,甚至在冬季都有水华暴发[14~18].为了评估拟 实施的仙人河补水工程的效果,并避免工程的盲目 上马以及可能对水质和水生态系统产生的风险,本 研究以水质模型为基础,定量分析了外流域调水与 水位调控的可能水质响应,以期为有效地决策提供 科学依据. 仙人河的可引用水量为3 140 万m³•a⁻¹, 年补水量占程海蓄水量的 1.64%; 补水水质为 TN 1.0 mg•L⁻¹, TP 0.14 mg•L⁻¹, COD 2.9 mg•L⁻¹. 1.2 水动力-水质模型开发

1.2.1 水动力-水质模型

CE-QUAL-W2 是由美国陆军工程兵团开发的 二维、纵直两向水动力与迁移模型^[19],共含有 5 个 控制方程用来描述水动力情况,包括了连续性方程、 *x-*动量方程、*z-*动量方程、状态方程以及自由表面 方程^[6];其中连续性方程、状态方程和自由表面方 程可表示为式(1)~(3).

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \tag{1}$$

$$\rho = f(T_{w}, \mathcal{P}_{TDS}, \mathcal{P}_{ISS})$$
(2)

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^{h} UB \, dz - \int_{\eta}^{h} qB \, dz \qquad (3)$$

式中,*U* 为水平速度,m•s⁻¹;*B* 为时空变化的截面宽 度,m; *x* 为沿水表层体中心线的纵向笛卡尔坐标 值,右侧为正;*W* 为垂向速度,m•s⁻¹; *z* 为垂向笛卡 尔坐标,向下为正方向; *q* 为立面流的源与汇, g•(m³ s)⁻¹; ρ 为密度,kg•m³; $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$ 为 依赖于温度(T_w)、总溶解固体物浓度与盐度含量 (Φ_{TDS})及无机悬浮颗粒物浓度(Φ_{ISS})的密度函数; B_η 为表面宽度,m; η 为水面高度,m; *t* 为时间 *s*; *h* 为相对地平面高度,m.模型中各水质组分的迁移转 化关系需要用在源汇项中表示出的动力反应速率来 计算. CE-QUAL-W2 的水质迁移转化的控制方程 为:

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial \left(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)}{\partial x} = q_{\phi}B + S_{\phi}B \qquad (4)$$

式中, ϕ 为立面成分浓度, $g \cdot m^{-3}$; D_x 为温度与组分 纵向弥散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; D_x 为温度与组分垂向弥散 系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; q_{ϕ} 为立面单位体积内流入、流出量 变化率, $g \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$; S_{ϕ} 为立面源汇项, $g \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$.本研究以程海为例,基于数据和时间 的可行性,确定了与程海数据可获得性及决策支持 需求相匹配的模型结构,对与水质标准及相关的指 标 TN、TP、COD 与 TDS (矿化度)进行模拟.对于 TN、TP 与 COD 来说,运用一阶衰减项对总动力反 应通量进行表征,而 TDS 则按保守成分处理,采用 零衰减速率的方式进行模拟.

1.2.2 模型构建

程海水质模型的构造包括模型网格生成、模拟 时间确定、初始条件以及边界条件界定等.在本研 究中,由于缺乏数据对模型边界条件进行空间解析, 因此无法在模拟时对水质空间分布进行动态模拟. 基于有限的数据条件,最合理的选择就是在水平上 不对湖泊进行网格划分,而只在垂直方向解析水动 力状况^[20 21].此类水平空间整合的模型方法往往计 算效率高,且可以帮助回答各种流域水资源或污染 控制措施对湖泊整体水质影响的问题.基于水平空 间整合的技术方案,程海水体被划分为均匀厚度的 35 层,每层1 m、最深处 35 m,与实测深度基本吻 合;此后还进一步确定了模型网格的水位-体积曲线 符合实测的数据.

模型的模拟时间跨度为 2009-10-01 ~ 2010-06-

01;初始条件为 2009-10-01 的监测数据,并经前处 理成为 CE-QUAL-W2 的输入格式.模型的边界条件 包括水文、水质和气象边界条件;水文边界条件通 过 CE-QUAL-W2 附带的水平衡计算工具经反复迭 代得到,气象边界条件则以 2009~2010 年的观测数 据为基础,水质边界条件的设立则是本研究面临的 一个技术难题.在传统的水质模型研究中,水质边界 条件一般是基于流域模型的结果来给定的,但根据 程海现有的数据条件,还无法建立可靠的流域模型, 因此就无法用传统的方法界定程海水质模型的边界 条件.为此,本研究提出了应用多模式逆向水质模型 方法来同时推算水质边界条件和模型参数的方法.

1.3 基于逆向模拟与遗传算法的水质模型多模式 参数识别

综上所述 由于在本研究中缺少能充分表示入湖 污染负荷的数据 且现有的数据也不足以支撑开发可 靠的流域水文与污染物负荷模型 因此 程海水质模 型的开发就面临水质边界条件缺失的限制;本研究应 用基于逆向模拟与遗传算法的多模式负荷-参数识别 方法来实现对水质模型的校正^[22].多模式逆向参数 识别方法的本质是一种基于不确定性的从已知条件 (观测数据)推算未知状况(参数及边界条件)的数学 方法,目的在于克服逆向参数识别方法在应用时常受 到数据有限、最优解不唯一的困境^[10].在传统上,可 以通过耦合先验信息对逆向模拟问题进行预处理,以 解决最优解不唯一的问题.但事实上,有时候很难得 到充足的先验信息对模型进行预处理;如果将不精确 的先验信息强制性地应用到逆向模型中使其收敛 反 而会导致不可靠解的产生.为解决这一问题,可行的 方法就是使用多组解来表征水质模型参数的不确定 性问题.因此,多模式逆向参数识别方法不再寻求单 值解 取而代之是在计算可行的前提下寻求多组解; 然后应用已被识别的参数模式进行模型模拟和决策 情景的不确定性分析.

在本研究中,首先对程海的 CE-QUAL-W2 水质 模型构造逆向模型; 该逆向模型包括 2 部分的决策 变量:①模型静态参数,包括 TN、TP 及 COD 的一阶 降解系数;②模型动态边界条件,包括 TN、TP、COD 及 TDS 的动态边界条件.模型的目标函数为整个模 型对每次监测的 TN、TP、COD 及 TDS 模拟残差在 时间轴上的积分;由此构造的逆向模型的数学形式 是个非线性优化问题,因此采用了具有普适性的全 局优化算法,也即遗传算法,对该逆向模型进行求 解.在实施遗传算法中,采用了不同的计算参数为搜 索过程提供不同的收敛环境,包括种群大小、遗传 代数上界、变异系数、微种群算子以及生态位算子 等,以便产生不同的参数-负荷组合模式,实现多模 式逆向参数-负荷估值.

2 结果与讨论

2.1 水动力模型校验

模型校正的第一步是对水位和温度等基本物理 变量进行模拟和比较分析.水位校正是程海水动力-水质模型校正的基础,同时也是下文分析通过仙人 河补水进行水位调控情景对程海水质影响的基础. 图1的水位校正结果显示,本研究所建立的程海水 动力模型可有效实现对程海水位和水量平衡关系的 模拟.在水位校正确定水平衡后,温度校正将进一步 验证程海水动力模型对湖体的热力学平衡和动力的 模拟能力.对程海而言,主要的热平衡过程与影响因 子包含太阳辐射、气温-水温交换、大气逆辐射、风 以及蒸发等.CE-QUAL-W2 模拟了所有这些过程, 由图 2 可知,程海水动力模型较好地实现了对程海 热平衡关系的模拟.



2.2 多模式参数识别结果

本研究共对程海水质模型进行了 12.5 × 10⁴ 次迭代,并从遗传算法的最终收敛种群得到了 5 种不同的参数-负荷组合模式;再分别把这 5 组参 数-负荷组合引入程海 CE-QUAL-W2 模型中,得到 了多模式鲁棒预测模型.为了评估和应用多模式 逆向参数估计方法所获取的程海模型的准确度, 图 3 显示了模式(1)和模式(3)情况下模型模拟得 到的水质与观测值的比较.其余模式条件下,也均 取得了同样的准确度,限于篇幅,在此不做赘述. 由此,在 5 种通过逆向模型识别的参数模式下,本 研究所开发的程海水动力-水质模型较好地实现了 对水质浓度趋势的预测,因而可据此开展进一步 的情景分析.



图 3 参数模式(1)和(3)的模拟结果 Fig. 3 Water quality calibration under parameters pattern (1) and (3)

由于不同的参数模式代表了水质对外部条件变 化(如水位调控)的不同响应方式,因此当所有5种 参数模式都被用来进行情景分析时,其结果就涵盖 了预测结果中的不确定性,由此做出的科学推论或 管理决策就具有了鲁棒性(或可靠稳定性).如果在 某个参数模式下模型预测结果表明水位调控对水质 会产生明显影响,但是在另一个参数模式下模型结 构显示水质响应不明显,那么这种预测的不确定性 就告诉决策者应该对相应的水位调控决策持慎重态 度,并在实施任何此类工程前最好实施进一步的数 据收集和更高精度的模型研究以减小预测的不确定 性. 另一方面,如果所有参数模式下模型预测结果都 显示水位调控方案对水质有明显改善作用,那么决 策者就可以较为确定地相信水位调控方案的效益; 反之 如果在所有参数模式下模型预测结果都显示 水位调控对水质没有显著改善,那么决策者同样也 可以比较确信相应的水位调控方案对水质改善没有 显著效益.

3 程海水位调控的水质响应及多情景鲁棒预测

在完成程海水动力-水质模型的多参数模式逆向估值的基础上,应用该模型对程海水位调控的水质影响进行了基于不确定性的鲁棒预测研究.对于程海的水位调控,本研究集中考虑了调控水源为仙人河的4种模拟情景.在情景模拟中,预测的时间跨度为2a,对水质影响的评估以模拟出的第2a结果为依据,以充分考虑水位变化之后的水质响应.在下文的分析中,首先以第1种参数模式为基础,对情景模拟结果进行包含时间序列和平均响应在内的详细阐释,而后再基于多模式鲁棒预测结果对水位调控的水质影响进行综合评估.

3.1 仙人河在当前水质条件下以最大设计能力补水(情景1)

情景 1 是模拟在当前水质条件下,仙人河以最 大设计补水能力向程海进行补水,从而引起程海水 位变动及相应的水质变化.图 4 显示了情景 1 下第





1 种参数模式的模拟结果(横轴为天,起始时间为 2009 年 1 月 1 日),其中基准条件代表了没有水位 调控的状况.由图 4,在进行水位调控 1 a 后,程海水 位明显升高;但就水质指标而言,与基准相比虽然在 局部时间点上会有差异,但总体变化并不明显.由于 情景1已经建立在仙人河最大引水能力的基础上, 因此进一步增加引水量并不现实.当然,从其他水源 地调水也许可以进一步提高程海水位,但如图4所 示,即使在只有仙人河水源的条件下,持续的调水将 超出程海湖盆所能容纳的限度;也即,如果实施更多 的引入水就必须要考虑建造出流工程以维持适当的 水平衡.为了探索情景1下程海水质响应微弱的原 因,下文构造了另外3个情景,对不同的仙人河来水 水质对程海水质的影响进行模拟分析.

3197

3.2 仙人河在当前水质浓度降低 20% 条件下以最 大设计能力补水(情景 2)

情景 2 模拟在当前仙人河所有水质指标浓度均 降低 20% 的条件下,仙人河以最大设计补水能力补 水所造成的影响(图 5).如图 5 所示,尽管仙人河水 质浓度改善了 20%,在以最大设计能力引水的情况 下 程海水质的变化也只是比情景 1 稍改善了一点, 效果非常有限.

3.3 仙人河在当前水质浓度降低 50% 条件下以最 大设计能力补水(情景 3)

情景 3 在情景 2 的基础上进一步降低仙人河的 TN、TP 和 COD 浓度. 该情景模拟在当前仙人河水 质浓度降低 50% 的条件下,仙人河以最大设计补水 能力排水所造成的水质响应(图 6). 同样,尽管对引 入水的水质进行了大幅度的改善,由此引起的程海 水质改善并不明显.

 4 仙人河在完全去除水中的污染物条件下以最 大设计能力补水(情景 4)

为了彻底对仙人河引水对程海水质影响的上界 做出评估.设计了一个极端情景——情景4,即在最 大设计引水能力基础上,完全去除仙人河来水中的 污染物.由于模型结果从时间序列上看不出与其他 3个情景的明显差异,在此本研究不单独绘制其时 间序列结果.由此,即使对仙人河来水在进入程海之 前进行深度处理,然后再以最大引水能力排水入程 海中,产生的水质响应也可能还是低到观测不到的 程度.

3.5 水位调控的程海水质响应综合分析

上文分析了第1种参数模式下4种不同情景的 水质响应结果,这些结果仅能被用作观察模型行为, 而无法基于此对水位调控的水质影响做结论.主要 的原因在于,参数模式只是代表了可能的系统响应 途径,上文识别的5种参数模式代表了系统的5种 可能的响应方式.因此,对程海水位调控的水质影响 的结论性评估必须考虑这些可能的响应模式下的水



图 5 情景 2 下的仙人河补水及水质响应





Fig. 6 Lake Xianren water replenishemnt and the response of water quality under scenario 3

质结果,即必须以鲁棒预测分析的结果作为评估依据.图7展示了情景1下程海水质响应情况的鲁棒预测结果,其中纵坐标代表相应的水位调控情景所引起的水质相对变化;由图7可见,对于相同的水位调控情景,用不同的参数模式得到的相对水质响应强度具有一定的差异,但总的来看,这种由于系统响应方式不确定性引起的水质变化差异比较小,而且从趋势上具有一致性.其余3个情景下的结论与情景1类似,限于篇幅,在此不再赘述.

综合 5 种参数模式的模拟结果,图 8 总结了上述 4 种水位调控情景的水质响应区间.图 8 的结果显示, 由单纯的水位调控所引起的最大水质响应水平甚至 没有达到可以观测到的程度;在极端水质控制强度 下(情景 4),TN 响应可达到约 2.5%,TP 响应也可 达到约 1.5%,而 COD 则可以达到 4.5%;这些情景 进一步证明了程海水位调控对水质改善效果的局限



图7 不同参数模式下的水质响应

Fig. 7 Response of water quality under different parameter patterns





性.需要注意的是,所有这些情景都是以多模式鲁棒 预测的方法进行分析的;虽然不同的参数模式给出 的响应不完全一样,体现了模型中的不确定性,但对 每一个情景,所有参数模式预测出的响应在趋势和 水平上又是彼此一致的;说明在充分考虑模型不确 定性的情况下,本研究结果确认了程海水位调控对 TN、TP及COD等水质指标的改善作用是非常有限 的.其主要原因在于:引水量只有程海现状蓄水量的 1.64%,对水动力条件的改善有限;而程海为封闭 湖,没有对外的污染负荷输出.

4 结论

(1)本研究基于 CE-QUAL-W2 构建水质-水动 力模型 模拟程海水量与热动力平衡过程.水位校验 和温度校正结果表明,本研究建立的程海水动力-水 质模型可有效实现对程海水位和水量平衡与热平衡 关系的模拟.

(2) 对程海水质模型进行 12.5×10⁴ 次迭代,并 从遗传算法的最终收敛种群得到了 5 种不同的参 数-负荷组合模式.分别把这 5 组参数-负荷组合引 入程海 CE-QUAL-W2 模型中,得到的模型就构成了 多模式鲁棒预测模型.进行水位调控模型模拟到的 水质与观测值的比较结果显示,本研究所开发的程 海水动力-水质模型较好地实现了对水质浓度趋势 的预测.

(3)本研究设计了4种情景模拟仙人河引水的 程海水质响应,情景模拟结果显示,无论在何种水质 条件下以最大设计能力补水,程海的水质响应都低 到观测不到的程度.在充分考虑模型不确定性的情 况下,本研究结果确认了程海水位调控对TN、TP 及 COD 等水质指标的改善作用是非常有限的.

参考文献:

- [1] 李文朝. 浅型富营养湖泊的生态恢复──五里湖水生植被重 建实验[J]. 湖泊科学,1996 *8*(s1):1-10.
- [2] 潘红玺,王云飞,董云生. 洱海富营养化影响因素分析[J].
 湖泊科学,1999,11(2):184-188.
- [3] 李锦秀 杜威 孙以三.水动力条件对富营养化影响规律探讨
 [J].水利水电技术 2005 36(5):15-18.
- [4] 刘永,郭怀成,周丰,等.湖泊水位变动对水生植被的影响机
 理及其调控方法[J].生态学报 2006 26(9):3117-3126.
- [5] 颜昌宙,金相灿,赵景柱,等.云南洱海的生态保护及可持续 利用对策[J].环境科学 2005 26(5):38-42.

- [6] Chapra S C. Surface water-quality modeling [M]. New York: McGraw-Hill ,1997. 295-315.
- [7] Cole T M , Wells S A . CE-QUAL-W2: A Two-dimensional , Laterally Averaged , Hydrodynamic and Water Quality Model , Version 3.2 [R]. Vicksburg: US Army Engineering and Research Development Center 2003.
- [8] Zou R ,Lung W S. Robust water quality modeling calibration using an alternating fitness genetic algorithm [J]. Journal of Water Resource Planning and Management ,2004 ,130 (6): 471-479.
- [9] Little K W ,Williams R E. Least-squares calibration of QUAL2E
 [J]. Water Environment Research ,1992 64(2):170-185.
- [10] Zou R, Lung W S, Wu J. Multiple-pattern parameter identification and uncertainty analysis approach for water quality modeling [J]. Ecological Modeling 2009 220(5):621-629.
- [11] 沈晔娜,吕军,陈军华,等.水源区河流非点源污染物入河量 计算的水质方程反演方法[J].环境科学 2010 31(8):1768-1774.
- [12] Sen M ,Stoffa P L. Global Optimization Methods in Geophysical Inversion [M]. New York: Elsevier ,1995.
- [13] Beven K. On the concept of model structural error [J]. Water Science and Technology 2005 52(6):167-175.
- [14] 王若南、钱澄宇、程海藻类植物调查研究[J]. 云南大学学报 (自然科学版),1988,10(3):250-258.
- [15] 吴敬禄,蒋雪中.云南程海近 500 年来湖泊初始生产力的演 化[J].海洋地质与第四纪地质 2002 22(2): 95-98.
- [16] 杜菊芳. 程海湖流域生态环境现状及综合治理措施探讨
 [J]. 林业调查规划 2006 31(s1): 130-131.
- [17] 董云仙,金玉,胡锦乾,等. 程海冬季水华特征、成因与控制 对策[J]. 环境科学导刊 2010 29(3):28-31.
- [18] 万国江,陈敬安,胥思勤,等. 210Pbex 沉积通量突发增大对 湖泊生产力的指示——以程海为例[J]. 中国科学(D辑): 地球科学 2004 34(2):154-162.
- [19] Edinger J E , Buchak E M. A hydrodynamic and two-dimensional reservoir model: the computational basis [R]. Ohio: U. S. Army Engineer Division ,1975.
- [20] U. S. EPA. Final Report: Nutrients and Mercury TMDLs for Lake Wallenpaupack ,Pike and Wayne Counties [R]. Pennsylvania: U. S. EPA 2005.
- [21] Tetra Tech ,Inc. . Lost River model for TMDL development [R]. Water Resources and TMDL Center 2005.
- [22] 王建平,程声通,贾海峰.水质模型参数优化的遗传算法实现 及控制参数分析[J].环境科学 2005 **26**(3):61-65.